

学 位 論 文 要 旨

高強度鋼板の冷間圧延・焼鈍過程における ミクロ組織形成機構に関する研究

A study on microstructural evolution mechanism during
cold rolling and annealing in high strength steel sheets

金沢大学大学院 自然科学研究科

機械科学 専攻

次世代鉄鋼総合科学 講座

小川登志男

Abstract

Microstructural evolution mechanism during cold rolling and annealing in high strength steel sheets was investigated, focusing on the competing phenomena of recrystallization, precipitation and ferrite (α)-to-austenite (γ) phase transformation.

For the plain low-carbon steels without any microalloying elements, the remarkable retardation of recrystallization due to a pinning effect caused by the γ phase was observed when the steels were heated above A_{c1} temperature before the completion of α recrystallization. In the case of the low-carbon steels containing microalloying elements such as Nb and Ti, the very fine Nb or Ti-containing precipitates formed during annealing markedly inhibited the recrystallization of α . Moreover, the addition of Nb inhibited the progress of α recrystallization during annealing, thereby causing an increase in the γ fraction due to the increase in the nucleation sites of γ . The increase in γ fraction led to further retardation of α recrystallization and α refinement with the addition of Nb.

As mentioned above, microstructural evolution during annealing in the low carbon steels could be complicated since recrystallization, precipitation and α -to- γ transformation occur simultaneously. This finding in the present study will help the materials design of the high strength steel sheets in the future.

近年、自動車産業では地球温暖化問題を契機に CO₂ 排出規制や燃費規制が強化され、これに対応すべく燃費向上を目的とした車体軽量化への取り組みが進んでいる。自動車の重量の約 70%を鉄鋼材料が占めているため、車体軽量化には鋼板の強度を高くすることで、鋼板の薄手化を行うことが有効手段の 1 つである。同時に、高強度鋼板の利用は、車体軽量化だけでなく乗員の安全性確保の観点からも非常に効果的である。高強度鋼板の適用率は今後も益々の増加が見込まれており、現在の自動車産業では極めて需要の高い材料となっている。

一方、高強度鋼板の最も大きな課題としては、高強度化による「難プレス成形性」が挙げられる。プレス成形性が劣化すると、部品設計の形状自由度が低下すると共に、プレス成形時の割れやしわの発生頻度も高くなっているのが現状である。しかしながら、近年の急激な高強度鋼板の需要増加により、高強度鋼板の材料設計指針に関する基盤研究が追いついていないのが現状である。したがって、上記課題を解決するために、高強度鋼板における添加元素や製造条件を見直すための新たな材料設計指針を確立することが現在急務となっている。

高強度鋼板はその使用用途によって要求特性が異なり、その作り分けのためには鋼板のミクロ組織を緻密に制御する必要があるが、高強度鋼板のミクロ組織形成機構については十分な知見が得られているとは言い難い。例えば、焼鈍中に γ 相が存在する中での α 再結晶挙動に関する知見はほとんどない。また、焼鈍中におけるマイクロアロイの存在状態の変化を考慮した上で α 再結晶挙動を解析した例も見当たらない。つまり、複数の冶金現象が同時に起こる場合のミクロ組織形成機構については、依然として未解決の部分が多いのが現状である。焼鈍中におけるミクロ組織形成挙動の実態が明らかでないということは、自動車用高強度鋼板の安全性および信頼性を向上させ、また特性をさらに向上させるための材料設計の指針を立てるのが困難であるということでもある。そこで本研究の着想として、材料設計上従来はほとんど考慮されることの無かった焼鈍中の再結晶、相変態および析出の競合現象に着目し、焼鈍中のミクロ組織形成挙動に関する正しい理解を得ることで、

高強度鋼板の組織微細化という観点から新たな材料設計指針を確立すると共に、高強度鋼板の安定供給の一助となることを本研究の目的とする。以下に、本研究における成果の概要を示す。

Nb や Ti といったマイクロアロイが焼鈍中の α 再結晶の進行を抑制することは従来から良く知られている。また、その再結晶抑制効果は、主に固溶原子による solute drag 効果と析出物による pinning 効果によって発現すると考えられてきた。しかしながら、従来の技術では solute drag 効果と pinning 効果を定量的に評価し、再結晶抑制効果に対するそれぞれの寄与度を明確にするのは困難であった。本研究では、主に TEM (Transmission Electron Microscopy) および AP-FIM (Atom Probe-Field Ion Microscopy) を用いた解析により、マイクロアロイの添加による solute drag 効果と pinning 効果を定量的に評価し、焼鈍中における Nb/Ti-C クラスターの形成が α 再結晶の進行を著しく抑制することを明らかにした。軟鋼板の場合、焼鈍中の再結晶と粒成長を促進するために、熱間圧延後の高温での巻取り工程において全ての C を比較的粗大な炭化物として析出させるため、材料設計上冷間圧延後の焼鈍中におけるマイクロアロイの存在状態の変化を考慮する必要がなかった。一方、高強度鋼板の材料設計においては、熱延板中におけるマイクロアロイの存在状態だけでなく、焼鈍中におけるマイクロアロイの存在状態についても緻密に制御する必要がある。したがって、軟鋼板と比べると、高強度鋼板はより緻密な温度制御が要求されることになる。

また本研究では、 $\alpha+\gamma$ 二相域焼鈍中における α 再結晶の進行が γ 相の存在により著しく抑制されることを世界で初めて見出した。高強度鋼板の材料設計においては、 $\alpha+\gamma$ 二相域で焼鈍することでマイクロ組織の一部を α から γ 相へ相変態させた後、急冷することで γ 相をベイナイトやマルテンサイトといった硬質組織へ相変態させ、組織強化を活用することが重要である。また、 α 粒径やマルテンサイトの形態や分散状態を最適化して、所望の特性を発現させることが重要である。一方、 α 再結晶と $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態が競合することにより α 再結晶の進行が著しく抑制されることは、従来の材料設計上全く考慮されていない現象である。したがって、今後の高強度鋼板の材料設計においては、 γ 相の分率や分布状態が α 再

結晶挙動におよぼす影響についても考慮する必要がある、これは高強度鋼板における重要な材質支配因子の 1 つとなり得る。加えて、 α 単相域においてどの程度 α 再結晶を進行させた上で $\alpha+\gamma$ 二相域へ加熱するのかという点も極めて重要であり、その点を考慮して添加元素や製造条件を検討する必要がある。

さらに本研究では、マイクロアロイと γ 相による再結晶抑制効果が同時に働いた場合、両因子の相乗効果により焼鈍中における α 再結晶の進行は著しく抑制されることを明らかにした。軟鋼板の場合、深絞り性に対し最適な集合組織を得るために、焼鈍中の α 再結晶挙動を適切に制御している。一方、高強度鋼板を $\alpha+\gamma$ 二相域で焼鈍する場合、最適なマイクロアロイの存在状態と γ 相の分率や分布状態をそれぞれ想定した上で、焼鈍中の α 再結晶挙動を適切に制御し、 α 再結晶挙動が引張強度や全伸びといった機械的性質に与える影響まで考慮する必要がある。本研究は、そのための基本的な指導原理を与えるものと考え

る。

上述したように、焼鈍中の再結晶、相変態および析出の競合現象に着目して高強度鋼板における焼鈍中のミクロ組織形成挙動を解析し、高強度鋼板の材料設計上極めて重要な新しい知見を得た。本知見を活用して、今後高強度鋼板がより安定的に供給されると共に、高強度鋼板のさらなる特性の向上と適用拡大に期待したい。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

.....高強度鋼板の冷間圧延・焼鈍過程におけるミクロ組織形成機構に関する研究.....

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 小川 登志男

3. 審査結果の要旨（600～650字）

.....当該学位論文に関し、平成29年2月3日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に審査した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通りの判定をした。

.....本論文は、自動車用高強度鋼板の材料設計上の基本指針を提示することを目的に、従来取り組まれてこなかった冷間圧延・焼鈍中の再結晶、相変態および析出の競合現象に着目し研究を行ったものである。すなわち、高強度鋼板の特性と密接に関わるミクロ組織の形成機構の解明に焦点を当てた基盤研究である。まず、再結晶と析出の競合現象に取り組んだ。焼鈍中に微細な Nb/Ti-C クラスターが形成されるとフェライト (α) の再結晶が著しく抑制されることを明確にした。次に、再結晶と $\alpha \rightarrow$ オーステナイト (γ) 逆変態の競合現象の解明に取り組んだ。未再結晶 α のサブグレイン境界あるいは再結晶/未再結晶界面に形成される微細な γ が α の再結晶を抑制する知見を世界で初めて獲得した。さらに、再結晶、相変態と析出の三者が競合する場合には、まず析出が焼鈍中に生じ α の再結晶を抑制し、続いて未再結晶 α から微細 γ が核生成する。これらの相乗効果により α の再結晶は著しく抑制される。最終的にはきわめて微細な α 組織が連続再結晶プロセスにより形成される知見を得た。これは、高強度鋼板の特性に大きく影響する重要な新知見である。

.....以上のように、本論文は自動車用高強度鋼板の設計にとって貴重な指針を与えるものであり、学術的にも工業的にも価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士（ 工 学 ）